

Математические модели социально-экономических процессов

Структура комплексной модели транспортной системы г. Москвы*

А. С. Алиев, Д. С. Мазурин, Д. А. Максимова, В. И. Швецов

Аннотация. Представлена комплексная методика прогноза транспортных и пассажирских потоков, основанная на 4-шаговом подходе. Предложена соответствующая крупному городу структура передвижений, включающая описание слоев передвижений, методы оценки объемов передвижений, расщепление по видам транспорта, оплату за проезд и парковку и другие аспекты. На основе разработанной методики реализована транспортная модель транспортной системы г. Москвы и ближайших пригородов. Начата разработка варианта модели, учитывающей цепочки взаимосвязанных передвижений. Модель с тройной цепочкой одного типа была реализована на тестовом примере.

Ключевые слова: моделирование транспортных потоков, матрица корреспонденций.

Введение

Задача моделирования автомобильных и пассажирских потоков в транспортной сети крупных городов является актуальной в связи с возросшим объемом передвижений. В настоящей работе представлена комплексная методика прогноза транспортных и пассажирских потоков, основанная на 4-шаговом подходе. Разработана соответствующая крупному городу структура передвижений, включающая описание слоев передвижений, методы оценки объемов передвижений, расщепление по видам транспорта, оплату за проезд и парковку и другие аспекты.

В мире существует большое число транспортных моделей в рамках 4-шагового подхода (см., например, [1, 2]), однако сам этот подход формирует только общую схему расчетов. Разработанная ме-

тодика предлагает конкретные решения по подготовке данных, алгоритмам на всех шагах расчета, а также по взаимному влиянию этих шагов (оценка общих объемов передвижений, расчет корреспонденций, модальное расщепление и распределение потоков по сети).

Развитие моделей прогноза транспортных потоков в мире в основном идет по пути усложнения алгоритмов. Однако для целей долгосрочного планирования требуются более простые модели, в частности, не требующие излишней (неизвестной на ранних этапах планирования) детализации параметров транспортной системы. Мы предлагаем механизмы учета цепочек в рамках простой 4-шаговой схемы, то есть сохраняя относительную вычислительную простоту. Другой важной отличительной характеристикой разработанной модели является использование на всех шагах расчета согласованной концепции

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 13-01-12030.

обобщенной цены как критерия выбора целей, способов и путей передвижения.

Общая методика изложена в разделе 1. В разделе 2 представлена транспортная модель транспортной системы г. Москвы и ближайших пригородов, основанная на данной методике. Описано формирование банка исходных данных, основные калибровочные параметры, а также выходные показатели модели. В разделе 3 дано описание начального варианта модели, явно учитывающей цепочки взаимосвязанных передвижений. Модель с тройной цепочкой одного типа была реализована на тестовом примере.

1. Методика моделирования

Методика моделирования представляет собой вариант 4-шаговой схемы. Она является развитием и модификацией методики, ранее примененной для моделирования московской агломерации в работе [3]. Исходными данными для задачи прогноза потоков являются распределение объектов посещения по территории города, а также *подвижность* населения, т. е. количество передвижений с различными целями, совершаемых в течение дня (недели или года) средним жителем. Классификация передвижений по цели приводит к понятию *слоев передвижений*. Полная характеристика подвижности состоит в определении частоты передвижений каждого слоя.

Для каждого слоя передвижений производится расчет целого набора матриц корреспонденций между расчетными районами города, соответствующих передвижениям, совершаемым разными способами (пешеходным, автомобильным и совершаемым в системе общественного транспорта) в разное время суток. Для учета суточной неравномерности расчеты производятся отдельно для каждого периода суток (например, для утреннего и вечернего часа пик и на средний дневной час).

Расчет матриц корреспонденций обычно осуществляется с применением *гравитационных* или *энтропийных* моделей [4–6]. Расщепление корреспонденций по способам передвижения (*модальное расщепление*) осуществляется с использованием стандартной модели дискретного выбора *multinomial logit*. Для моделирования загрузки улично-дорожной сети используется концепция *равновесного распределения* потоков [7, 8]. Расчет загрузки системы общественного транспорта производится по модели *оптимальных стратегий* [9], причем в рамках настоящей работы предложена модификация алгоритма, позволяющая учитывать провозные способности транспортных средств.

1.1. Обобщенная цена передвижений

Под *обобщенной ценой* пути будем понимать критерий, на основании которого пользователь оценивает альтернативные пути и способы передвижения. Обобщенная цена определяется как взвешенная сумма слагаемых, выражающих влияние факторов различной природы на оценку пути. Основным вкладом в обобщенную цену дает время передвижения, включающее в себя как время движения, так и дополнительные задержки на различных элементах транспортной сети (время подготовки автомобиля к поездке, время парковки, время ожидания). Дополнительно обобщенная цена должна включать в себя денежные затраты (плата за проезд в общественном транспорте, платные дороги, плата за въезд в определенные зоны города), а также условные штрафные добавки времени, выражающие, например дискомфорт поездок с пересадками на общественном транспорте и др. Дополнительные составляющие выражаются в условных минутах и прибавляются к времени. Коэффициенты приведения являются характеристиками «транспортного поведения» населения. Они должны определяться из социологических исследований (опросов), а также в ходе калибровки моделей.

В рамках разработанной методики обобщенная цена используется последовательно на всех стадиях моделирования транспортных потоков:

- при расчете матриц корреспонденций в качестве меры «межрайонной транспортной дальности» используются обобщенные цены оптимальных путей;
- модальное расщепление осуществляется на основе сопоставления обобщенных цен передвижений разными способами;
- в алгоритме распределения корреспонденций по путям в сети обобщенная цена используется для сравнения привлекательности альтернативных путей.

Тем самым модель позволяет оценить влияние каких-либо изменений в обобщенных затратах на все аспекты процесса формирования транспортных потоков.

1.2. Моделирование межрайонных корреспонденций

Передвижения, совершаемые жителями города, различаются по цели. Например, передвижения из дома на работу или за покупками и др. Различным целям соответствуют различные объекты посещения — соответственно, места труда, магазины и др. Отметим, что один и тот же объект может посещаться с разными целями — например, как место

работы для сотрудников и как место обслуживания для клиентов. Кроме того, будем различать передвижения с одной целью, совершаемые от разных объектов. Например, передвижения за покупками, совершаемые из дома или попутно по дороге домой от места работы. Суммируя сказанное, приходим к следующему определению. Будем называть *слоем* передвижений совокупность передвижений, совершаемых с одинаковой целью между объектами одного типа. Смысл деления на слои состоит в том, что передвижения, принадлежащие разным слоям

- по-разному распределяются по территории города, так как совершаются к разным объектам;
- обладают разной чувствительностью к фактору дальности;
- по-разному распределяются по времени суток.

В практике моделирования не существует фиксированной классификации целей передвижений и, соответственно, типов объектов посещения. Для разных городов и разных моделей принимается та или иная классификация в зависимости от наличия исходной информации и постановки задачи для моделирования.

Первым шагом 4-шаговой модели является оценка общих объемов прибытия и отправления в каждом районе. Эта оценка строится на основе информации о пространственном размещении объектов посещения. Далее производится расчет матриц межрайонных корреспонденций и их расщепление по способам передвижения. Важным недостатком 4-шаговой модели можно считать тот факт, что отдельные матрицы корреспонденций вычисляются и расщепляются по способам передвижений независимо друг от друга. В результате, например, может не совпадать количество людей, использующих автомобиль для поездки из дома на работу и обратно. Для корректного моделирования реальной структуры передвижений необходимо, таким образом, учитывать, что передвижения объединены в цепочки. Цепочка — это последовательность передвижений, которая начинается и заканчивается в одном месте (обычно, дома). Например, «дом-работа-магазин-дом». Как правило, способ передвижения не меняется для всех звеньев цепочки. Исключение могут составлять «промежуточные» цепочки, т. е. цепочки, начинающиеся и заканчивающиеся в некотором промежуточном пункте. Например, в течение рабочего дня человек мог совершить деловую или бытовую поездку с возвращением на рабочее место.

Последовательное развитие в направлении учета цепочек и других аспектов взаимной зависимости разных поездок привело к созданию т. н. моделей активности («active-based models»). Среди известных практически реализованных моделей это-

го типа можно упомянуть модель Стокгольма [10] или Нью-Гемпшира [11]. При практической реализации моделей активности вместо расчета многоиндексных массивов производится микромоделирование отдельных передвижений методом Монте-Карло. Модели активности, однако, намного сложнее в реализации, требуют проведения масштабных и трудоемких социологических обследований и имеют очень большие времена счета сравнительно с 4-шаговыми моделями. С учетом этих трудностей в рамках настоящего подхода применяется упрощенная схема учета цепочек передвижений. В данной схеме для передвижений, являющихся промежуточными в цепочке, вычисляются отдельные матрицы корреспонденций, причем для каждого района объемы прибытия и отправления считаются одинаковыми. При таком подходе промежуточные передвижения отражают общий количественный «фон» передвижений в сети, не нарушая балансов прибытий и отправок в каждом районе.

Для комплексного прогноза загрузки транспортной сети требуется расчет большого набора матриц корреспонденций между расчетными районами города, а именно, требуются разные матрицы для

- разных слоев передвижений;
- разных способов передвижений (например, пешком, на автомобиле, на общественном транспорте);
- разного времени суток (например, для утреннего и вечернего часа пик и для среднего дневного часа).

Расчет матриц корреспонденций проводится по гравитационной модели [5, 12] с использованием различных *функций тяготения* для передвижений с различными целями. В качестве меры «транспортной дальности» используется цена оптимального пути между районами. Параметры функции дальности, определяющие «чувствительность» корреспонденций к фактору дальности. Значения этих коэффициентов определяются из эмпирических обследований [13–15].

1.3. Модальное расщепление корреспонденций

Модальное расщепление корреспонденций производится в зависимости от соотношения обобщенных цен передвижений разными способами. Под различными способами передвижений понимают, например, передвижение пешком, поездку на автомобиле или на общественном транспорте. Модальное расщепление осуществляется с применением стандартных моделей дискретного выбора (см., например, [16, 17]). В стандартной модели предполагается,

что каждая из n альтернатив характеризуется значением *полезности* U_i , $i = 1, n$. Полезность влияет на вероятность выбора соответствующей альтернативы при том, что сам процесс выбора представляется стохастическим. Принимая различные гипотезы о характере распределения случайных величин, можно получить те или иные оценки для средних долей выбора альтернатив. В частности, в одной из наиболее распространенных (в силу простоты численной реализации), является *multinomial logit* модель, в которой вероятности выбора альтернатив оказываются пропорциональными экспонентам от полезностей:

$$s_i = \frac{e^{U_i}}{\sum_{j=1,n} e^{U_j}}.$$

Применительно к задаче модального расщепления корреспонденций естественно связывать полезность с обобщенными затратами на передвижения разными способами, причем взятыми со знаком минус, поскольку полезность есть мера привлекательности, а увеличение затрат, наоборот, снижает привлекательность. Пусть U_{ij}^k — полезность выбора k -го способа при передвижении из района i в район j , C_{ij}^k — обобщенная цена этого передвижения. Тогда

$$U_{ij}^k = -\alpha^k C_{ij}^k - \beta^k. \quad (1)$$

Коэффициенты α^k характеризуют «чувствительность» корреспонденций к фактору дальности, коэффициенты β^k — «асимметрию» способов передвижения в том смысле, что при одинаковой обобщенной цене двух способов корреспонденция не обязательно поделится поровну между этими способами. Модальное расщепление производится индивидуально для каждой пары районов, т. е. вычисляются матрицы коэффициентов расщепления.

1.4. Распределение корреспонденций по путям в сети

Заключительный шаг 4-шаговой схемы состоит в распределении корреспонденций по путям, соединяющим пары районов. В результате распределения получаются значения потоков на всех элементах сети.

Фундаментальной особенностью улично-дорожной сети (УДС) является зависимость цен передвижений от загрузки элементов сети. Эта зависимость приводит к тому, что при общей значительной загрузке сети каждая корреспонденция распределяется между несколькими альтернативными путями, причем эти пути могут быть далеки от оптимальных путей, рассчитанных по свободной сети. Для моделирования загрузки УДС с учетом этого эффекта

используется концепция равновесного распределения [7, 8]. Под равновесным распределением понимается распределение, при котором ни у кого из участников движения нет мотивации для изменения пути, т. е. обобщенная цена всех альтернативных путей равна или превосходит цену пути, по которому он движется.

Распределение корреспонденций в системе общественного транспорта производится с использованием модели оптимальных стратегий [9]. Модель использует явное описание системы маршрутов. Для оценки времени ожидания используются средние интервалы движения, точное расписание отправок не используется. Данный подход хорошо подходит для моделирования внутригородских поездок. Вместо оптимальных путей в модели рассчитываются оптимальные *стратегии поведения*. В отличие от пути в стратегии продолжение движения по графу может определяться случайным событием прибытия на остановку того или иного транспортного средства.

Существенным недостатком модели оптимальных стратегий является то, что в ней не учитывается ограничение по вместимости транспортных средств. Этот недостаток особенно сильно проявляется в ситуации, когда перевозки по близким маршрутам производятся транспортными средствами с существенно разной вместимостью, например, микроавтобусами и большими рейсовыми автобусами. Для устранения этого недостатка в настоящей работе предложена следующая несложная модификация алгоритма. Матрица корреспонденций разделяется на n одинаковых порций, и каждая порция распределяется стандартным алгоритмом оптимальных стратегий. После распределения очередной порции пересчитываются обобщенные цены дуг графа, соответствующих посадкам в общественный транспорт. К стандартному времени ожидания и плате за проезд (выраженной в минутах) добавляются еще штрафные минуты, рассчитываемые в зависимости от заполнения салона. Штрафная добавка отсутствует при небольшом заполнении салона и резко возрастает, когда заполнение близко и превышает вместимость (провозную способность). В частности, в модели Москвы были применены экспоненциально растущие штрафные добавки. Предлагаемая методика не исключает полностью превышения провозной способности в прогнозе, поскольку начальные порции корреспонденций могут быть распределены на маршруты, которые в дальнейшем окажутся переполненными, и уже не перераспределяются в ходе алгоритма. Однако как показала практика применения, алгоритм позволяет существенно уменьшить указанные эффекты и дать адекват-

ный прогноз загрузки разных типов транспортных средств.

Важной особенностью в задаче прогноза потоков является следующая обратная связь: матрицы корреспонденций и коэффициенты расщепления по типам зависят от обобщенных цен межрайонных передвижений. Однако сами эти цены зависят от результирующей загрузки элементов транспортной сети (и, в частности, могут различаться в разное время дня). Для приведения «входных» и «выходных» цен в соответствие друг с другом организуется итерационный процесс расчета матриц корреспонденций и распределения корреспонденций по сети.

2. Модель Московской агломерации

2.1. Общая характеристика модели и структура передвижений

Изложенная в разделе 2 методика практически реализована для транспортной сети Московской агломерации, включающей г. Москву и пригороды, в которых сконцентрирована значительная часть населения Московской области. Детализация транспортной сети повышается при переходе от районов Московской области к районам Москвы. В области введены только основные транзитные дороги, в Москве — все улицы и дороги общегородского и районного значения, в центральной части города введены все улицы вплоть до мелкой сети. Расчетный транспортный граф, показанный на рис. 1, содержит улично-дорожную сеть, сеть метрополитена и железных дорог с пригородно-городским движением (всего примерно 10 000 узлов и 30 000 дуг), а также систему маршрутов общественного транспорта. Вся моделируемая территория разделена на 1300 расчетных районов, средние размеры которых увеличиваются от центра к окраинам. Границы районов показаны на рис. 2.

Компьютерная реализация осуществлена с использованием программы TRANSNET, созданной сотрудниками Института Системного Анализа РАН (подробности на сайте www.isa.ru/transnet).

Все объекты посещения в модели разбиты на 7 типов в зависимости от цели передвижения (см. табл. 1). Каждый тип объектов порождает несколько слоев передвижений, а именно: «прямые» передвижения — из дома к объекту, «возвратные» передвижения — от объекта к дому, а также «промежуточные» передвижения, совершаемые от других объектов. Теоретически возможно рассмотрение $7 \times 7 = 49$ различных слоев промежуточных передвижений, однако, из соображений разумного упрощения модели промежуточные передвижения агрегируются путем объединения в один слой всех передвижений

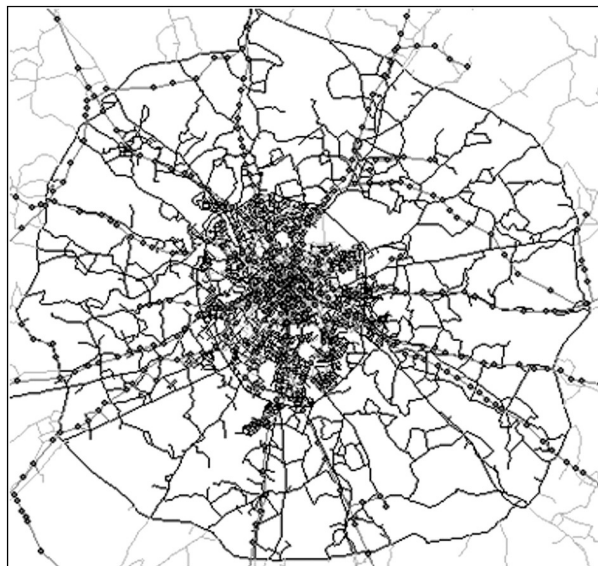


Рис. 1. Расчетный граф Москвы с пригородами



Рис. 2. Границы расчетных районов

с общим (по типу) объектом посещения, совершаемых от произвольных объектов (кроме дома). При этом передвижения к «вокзалам» от промежуточных объектов не рассматриваются, как малочисленные. В итоге рассматривается 20 слоев передвижений, показанных в таблице 2. В клетках таблицы приведены обозначения матриц корреспонденций слоев, используемые в дальнейшем. Агрегированные объекты посещения обозначены $O = W \cup C_1 \cup \dots \cup C_6$.

В отсутствие промежуточных передвижений матрицы «прямых» и «возвратных» передвижений сов-

Таблица 1

Моделируемые цели передвижений

Обозначение	Описание
H	места жительства
W	места работы (включая учебу в высшем учебном заведении)
C_1	места учебы (школы)
C_2	объекты культурно-бытового обслуживания местного посещения (далее БКБ — «ближний культбыт»)
C_3	объекты культурно-бытового обслуживания общегородского посещения (далее ДКБ — «дальний культбыт»)
C_4	объекты медицинского обслуживания
C_5	объекты для проведения досуга или отдыха
C_6	вокзалы и аэропорты (как объекты посещения пассажиров и встречающих-проводжающих лиц)

падали бы с точностью до транспонирования. В реальности количество «прямых» и «возвратных» передвижений для каждой пары районов, вообще говоря, не совпадает из-за наличия промежуточных передвижений. Отношение общего количества «возвратных» передвижений к количеству «прямых» обозначены коэффициентами k^W , k_1^C , ..., k_6^C в левом столбце таблицы 2. В данной модели принято упрощающее предположение, согласно которому «возвратные» матрицы вычисляются транспонированием «прямых» матриц и умножением на указанные коэффициенты.

Коэффициенты подвижности для каждого слоя будем обозначать буквой m с указанием обозначения слоя, например m^{HW} , m^{HC_1} , ..., m^{HC_n} . В таблице 3 показаны коэффициенты подвижности для всех слоев (указано среднее количество передвижений на тысячу жителей), основанные на имеющихся статистических данных и на результатах калибровки модели. Значения подвижности для агрегированных слоев, очевидно, вычисляются суммированием элементов в этой таблице:

$$m^{OW} = m^{WW} + \sum_i m^{HC_i},$$

$$m^{OC_j} = m^{WC_j} + \sum_i m^{C_i C_j}, \quad j = 1, 6.$$

2.2. Формирование массива исходных данных

Наиболее трудной задачей является сбор исходных данных о размещении различных объектов на территории города. Основные проблемы здесь следующие:

- предоставляемая государственными статистическими организациями информация часто лишена географической привязки, либо эта привязка носит приблизительный характер. Например, часть информации предоставляется в разбивке по муниципальным районам г. Москвы, в то время как расчетные транспортные районы существенно мельче (приблизительно на порядок в разработанной модели);
- часто географическая привязка носит формальный характер. Например, все рабочие места географически относятся к юридическому адресу предприятия, которое может быть адресом центрального офиса, в то время как реальные места труда (производственные, торговые или складские помещения) могут находиться в других районах города;
- статистические данные об объектах могут лишь косвенно характеризовать количество посещений. Например, сведения о торговых площадях или количестве работников недостаточны для оценки фактических объемов посещения объектов объектов торговли или обслуживания.

Для преодоления указанных трудностей в данной работе при формировании данных использовались экспертные оценки, а также корректирующие коэффициенты и функции, подбираемые в ходе калибровки.

Напомним, что, согласно общему подходу, общие объемы отправления и прибытия в системе определяются общим количеством населения и коэффициентами подвижности, показанными в таблице 3. Характеристики районов определяют долю прибытия и отправления, приходящуюся на тот или

Таблица 2

Моделируемые слои передвижений								
	Дом	Раб.	Шк.	БКБ	ДКБ	Мед.	Досуг	Вокз.
Дом		HW	HC_1	HC_2	HC_3	HC_4	HC_5	HC_6
Объект		OW	OC_1	OC_2	OC_3	OC_4	OC_5	OC_6
Работа	$WH = k^W HW$							
Школы	$C_1H = k^{C_1} HC_1$							
БКБ	$C_2H = k^{C_2} HC_2$							
ДКБ	$C_3H = k^{C_3} HC_3$							
Мед	$C_4H = k^{C_4} HC_4$							
Досуг	$C_5H = k^{C_5} HC_5$							
Вокзалы	$C_6H = k^{C_6} HC_6$							

Таблица 3

Подвижность населения								
	Дом	Раб.	Шк.	БКБ	ДКБ	Мед.	Досуг	Вокз.
Дом	570	250	180	85	20	70	15	
Работа	470	160	15	70	20	10	10	0
Школы	230	15	0	15	0	0	20	0
БКБ	270	10	15	150	20	0	20	0
ДКБ	95	0	0	20	10	10	0	0
Мед	30	0	0	10	0	0	0	0
Досуг	80	0	0	40	0	0	10	0
Вокзалы	15	0	0	0	0	0	0	0

иной район. Соответственно, фактически на оценку прибытия и отправления влияют только относительные характеристики, т. е. доли объектов того или иного типа, находящиеся в районе, от общего числа объектов во всех районах. Будем называть количество объектов того или иного типа в районе (*абсолютной*) емкостью, а долю этих объектов от общего числа объектов данного типа в системе — *относительной емкостью* района по объектам данного типа. Благодаря использованию относительных емкостей несущественным становится вопрос об единицах измерения абсолютных емкостей, что облегчает возможности оценок.

Разная методика применялась к оценке емкостей районов г. Москвы и московской области. В московской области транспортные районы выбраны в соответствии с административно-территориальным де-

лением. Соответственно, численность населения P_i и число рабочих мест W_i в этих районах были взяты из открытых статистических данных. Для районов г. Москвы применялось оценивание характеристик с использованием данных по объему и характеру застройки. Для этого была проведена визуальная экспертная оценка площади жилой и нежилой застройки с учетом этажности для всех районов. Площадь жилой и нежилой застройки обозначим, соответственно, S_i^P и S_i^W . Относительные характеристики, т. е. доли жилой и нежилой застройки, обозначим как

$$s_i^P = \frac{S_i^P}{\sum_j S_j^P}, \quad s_i^W = \frac{S_i^W}{\sum_j W_j^P}.$$

Из статистики известно, что площади нежилой застройки (офисные, производственные, складские)

значительно интенсивнее используются в центре города, чем на окраинах. Кроме того, по мере приближения к центру изменяется характер использования нежилрой застройки в пользу офисного и торгового использования по сравнению со складским и производственным, что приводит также к увеличению числа занятых работников на единицу площади, т. е. к эффективному увеличению нежилрой застройки. Для учета этого эффекта в модель была введена функция коррекции эффективной площади нежилрой застройки, возрастающая от окраин к центру, следующего вида:

$$\kappa_i^D = \begin{cases} 1, & r_i^c \leq r^{\text{th}}, \\ \delta^D + (1 - \delta^D) * e^{-\gamma^D(r_i^c)^{\beta^D}}, & r_i^c > r^{\text{th}}, \end{cases}$$

где r^{th} — пороговое расстояние от центра, начиная с которого действует корректирующий коэффициент, β^D , γ^D и δ^D — калибровочные коэффициенты. Пороговое расстояние было взято равным $r^{\text{th}} = 3$ км, что примерно соответствует радиусу исторического центра Москвы. Значения других коэффициентов были опеределены в ходе калибровки как $\beta^D = 0,85$, $\gamma^D = 0,6$, $\delta^D = 0,37$. Таким образом, «эффективная» доля нежилрой застройки вычисляется по формуле

$$\bar{s}_i^W = \frac{s_i^W \kappa_i^D}{\sum_k s_k^W \kappa_k^D}.$$

Обозначим малыми буквами p_i и w_i , соответственно, долю населения и рабочих мест в районе i от суммарного населения и числа рабочих мест во всех районах Москвы. Долю населения оцениваем пропорционально площади жилой застройки. Места труда могут находиться не только в нежилрой, но и частично в жилой застройке. Примем допущение, что пропорционально площади жилой застройки распределено приблизительно 20 % рабочих мест. Соответственно, получим:

$$p_i = s_i^P, \quad w_i = 0,8\bar{s}_i^W + 0,2s_i^P.$$

Относительные емкости районов по объектам КБ, перечисленным в таблице 1, обозначим, соответственно, c_i^1 , ..., c_i^6 . Примем, что места учебы (школы) распределены по районам пропорционально численности населения: $c_i^1 = p_i$. Емкость вокзалов и аэропортов c_i^6 , как источников и стоков для потоков прибывающих и отправляющихся пассажиров дальнего следования, а также встречающих и провожающих лиц, естественно оценивать пропорционально пассажирообороту вокзалов и аэропортов, известному из официальной статистики. Емкости объектов ДКБ (c^3), медицины (c^4) и досуга (c^5), такие как крупные торговые центры

общегородского пользования, строительные рынки, больницы, торгово-развлекательные комплексы и др. оценены экспертно в баллах $b_i^{C^k}$, $k = 3, 4, 5$. Поскольку в дальнейшем используются только относительные показатели, единицы измерения («масштаб баллов») выбирались независимо для разных видов КБ. К полученному на основе экспертной оценки распределению дополнительно применена коррекция, повышающая интенсивность посещения указанных объектов по мере приближения к центру Москвы. Для вычисления корректирующего коэффициента используется следующая функция:

$$\kappa_i^T = \delta^T + (1 - \delta^T) * e^{-\gamma^T t_i^c}, \quad (2)$$

где t_i^c — обобщенная цена передвижения от центра до района i , усредненная по видам транспорта с учетом коэффициентов расщепления. В ходе калибровки были подобраны следующие значения коэффициентов: $\delta^T = 0,56$ и $\gamma^T = 0,02$. Таким образом, вычисляем относительные емкости по перечисленным объектам КБ по формуле:

$$c_i^k = \frac{b_i^{C^k} \kappa_i^T}{\sum_j b_j^{C^k} \kappa_j^T}, \quad k = 3, 4, 5.$$

Согласно эмпирическим данным, подвижность с культурно-бытовыми целями, в отличие, скажем, от трудовой подвижности, может заметно меняться от района к району. Культурно-бытовая подвижность меняется в зависимости от «удобства» расположения районов, — она выше в тех районах, из которых можно быстрее и легче добраться до большего числа объектов КБ. Для моделирования этого эффекта в общем случае необходимо вычислить некоторый показатель «удобства» расположения района и связать с ним КБ подвижность. С учетом центрально симметричной конфигурации московской транспортной сети можно приближенно считать, что время (обобщенная цена) поездки от центра коррелирует с «удобством» расположения района. Поэтому для объемов отправления с целями КБ были применены корректирующие коэффициенты (2). Таким образом относительные емкости по отправлению из дома с целями КБ $C^2 - \dots - C^5$ (т. е. все, кроме школ и вокзалов) пропорциональны не действительной, а скорректированной численности населения. Относительную скорректированную численность населения мы обозначим q_i :

$$q_i = \frac{P_i \kappa_i^T}{\sum_j P_j \kappa_j^T}.$$

Параметры p_i , q_i определяют относительные емкости по отправлению из дома с различными

целями, т. е. для слоев передвижений, показанных в первой строке таблицы 2. Для слоев промежуточных передвижений, показанных во второй строке таблицы, объемы отправления порождаются объектами промежуточного посещения разных типов. Следовательно, для получения относительных емкостей слоев промежуточных передвижений по отправлению, нужно сложить и занормировать абсолютное отправление для всех слоев типа «объект-объект». Относительную суммарную емкость отправления от объектов разных типов обозначим g_i . Очевидно, что коэффициенты g_i вычисляются с использованием значений коэффициентов подвижности по формуле:

$$g_i = \frac{m^{WO} w_i + \sum_{k=1}^5 m^{C_k O} c_i^k}{m^{WO} + \sum_{k=1}^5 m^{C_k O}}.$$

Для слоев «возвратных» передвижений от объектов домой относительные объемы отправления и прибытия, очевидно, совпадают с «переставленными» объемами отправления и прибытия «прямых» передвижений. Окончательно приведем сводку формул для вычисления относительных емкостей по отправлению и прибытию для всех слоев передвижений, которые мы обозначим, соответственно, o_i^{XY} , d_i^{XY} , где «XY» — это двухсимвольные обозначения слоев из таблицы 2:

$$\begin{aligned} o_i^{HW} &= o_i^{HC_1} = o_i^{HC_6} = p_i, & o_i^{HC_k} &= q_i, & k &= 2, 5, \\ o_i^{OW} &= o_i^{OC_k} = g_i, & k &= 1, 6, \\ o_i^{WH} &= d_i^{HW}, & o_i^{C_k H} &= d_i^{HC_k}, & k &= 1, 6, \\ d_i^{HW} &= d_i^{OW} = w_i, & d_i^{HC_k} &= d_i^{OC_k} = c_i^k, & k &= 1, 6, \\ d_i^{WH} &= o_i^{HW}, & d_i^{C_k H} &= o_i^{HC_k}, & k &= 1, 6. \end{aligned} \quad (3)$$

Емкости, вычисляемые по формулам (3), в дальнейшем были дополнительно скорректированы в ходе калибровки модели. Основанием для такой коррекции служит сопоставление расчетных и фактически наблюдаемых. В частности, фактические объемы выхода на станциях метро в утренние часы были использованы для дополнительной коррекции числа рабочих мест в расчетных районах. Обозначим через f_j^{mod} — расчетный, f_j^{fact} — фактический объем выхода со станции метро j , $\delta f_j = f_j^{\text{mod}} - f_j^{\text{fact}}$ — «невязку» для станции j . Для каждой станции можно составить список обслуживаемых расчетных районов. Суммарное количество рабочих мест в этих районах W_j^{St} будем считать «обслуживаемым» станцией j . Некоторые районы обслуживаются несколькими станциями, в этих случаях рабочие места района делятся между обслуживающими станциями в экспертно

установленных пропорциях. Корректирующий коэффициент для станции j рассчитывается по формуле: $\kappa_j = \exp(\alpha \delta f_j / W_j^{\text{St}})$. Корректирующий коэффициент для каждого района определяется, как средний по обслуживающим этот район станциям.

2.3. Калибровочные параметры и выходные показатели

Матрицы корреспонденций для всех слоев рассчитываются по стандартной гравитационной модели с экспоненциально убывающей функцией тяготения. Если C_{ij} — мера дальности между районами i и j , то для слоя X функция тяготения имеет вид $G^X(C_{ij}) = \exp(-\gamma^X C_{ij})$. В качестве меры дальности используются обобщенные цены передвижения по оптимальным путям, усредненные по направлению «туда-обратно» и по способу передвижения. В ходе калибровки определены следующие значения коэффициентов для разных слоев передвижений: $\gamma^{C_1} = \gamma^{C_2} = 0,15$ («близкие» передвижения), $\gamma^W = \gamma^{C_3} = \gamma^{C_4} = \gamma^{C_5} = 0,065$ («дальние» передвижения), $\gamma^{C_6} = 0$ (поездки на вокзалы связаны с поездками в другие города, частота их совершения не зависит от расстояния до вокзала).

Расщепление корреспонденций по способам передвижения производится с использованием multinomial logit модели (см. раздел 1.3) с функциями полезности $U^k(C_{ij}^k)$ вида (1), где k пробегает набор значений, соответствующих разным способам передвижения: car (легковой автомобиль), pub (общественный транспорт), ped (пешком), C_{ij}^k — оптимальная обобщенная цена передвижения между районами i и j способом k . В модели Москвы использованы следующие значения коэффициентов: $\alpha^{\text{car}} = \alpha^{\text{pub}} = 0,012$, $\alpha^{\text{ped}} = 0,025$, $\beta^{\text{car}} \approx \beta^{\text{pub}} \approx 6 \sim 7$, $\beta^{\text{ped}} = 0$. Коэффициенты α выражают «чувствительность» корреспонденций к фактору дальности, соответственно, больший коэффициент для пеших передвижений выражает более быстрое их спадание с увеличением дальности. Коэффициенты β определены с точностью до постоянного слагаемого, поэтому один из коэффициентов всегда может быть выбран равным 0. Положительные значения β для передвижений транспортом «работают» в пользу выбора пеших передвижений на близких расстояниях, если использование транспорта не дает большого выигрыша в обобщенной цене.

В ходе калибровки коэффициентов модели достигнута приемлемая сходимость расчетных и фактических данных о передвижениях в Москве. Методику и детали калибровки мы планируем изложить в отдельной статье. В настоящей работе будет приведен перечень основных выходных показате-

лей модели и приведены конкретные значения ряда агрегированных показателей для московской агломерации.

По результатам моделирования формируется следующий набор расчетных данных:

- данные о загрузке (интенсивности транспортных и пассажирских потоков) для всех элементов транспортной сети. Данные представляются в табличной и графической форме;
- агрегированные показатели загрузки транспортной сети. К их числу относится суммарный пробег, суммарное затраченное время, средние по системе времена и длины передвижений и др.;
- функции распределения передвижений по дальности, времени и др.

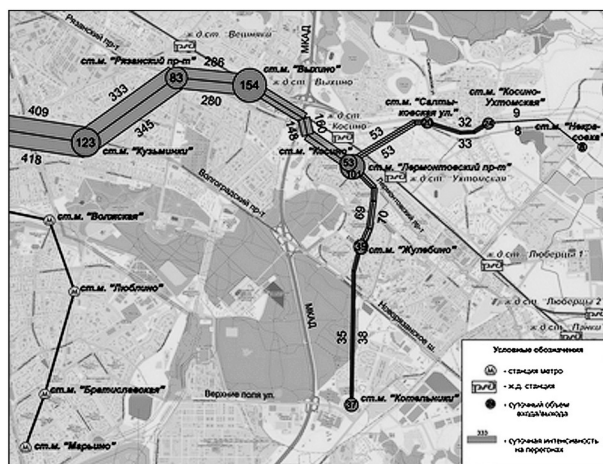


Рис. 3. Пример прогноза загрузки нового участка метро

На рис. 3 приведен пример прогноза загрузки нового участка метро. На картограмме показаны точные значения загрузки на перегонах и суточные значения объемов входа и выхода на станциях. В таблице 4 приведены значения ряда агрегированных показателей работы транспортной системы Московской агломерации. Под транспортной «работой» понимается суммарный пробег, выраженный в «автомобилекилометрах» или «пассажирокилометрах». Все показатели рассчитаны отдельно для одного типичного утреннего, дневного или вечернего часов. Показатель суммарных затрат времени на передвижения, совершенные в течение одного часа, выраженный в «автомобилечасах» (или «пассажирочасах»), одновременно имеет смысл суммарного количества автомобилей (пассажиров) одновременно находившихся в движении в течение этого часа. Агрегированные показатели могут быть также вычислены не для всей сети, а для интересующего района, или подсети, или по отдельным типам дуг, что дает

возможность всесторонне анализировать различные варианты развития транспортной сети и градостроительные планы.

3. Моделирование с учетом цепочек передвижений

Модель, учитывающая цепочки связанных передвижений, теоретически могла бы дать более точное воспроизведение структуры транспортных потоков города. Однако, как было сказано выше, последовательный учет цепочек приводит к значительному росту сложности вычислений. В связи с этим актуальна задача построения модели, которая могла бы учесть хотя бы часть эффектов, связанных с цепочками, при этом сохраняя простоту реализации, характерную для обычной 4-шаговой схемы.

Напомним, что цепочка передвижений — это упорядоченные по целям передвижения от одного объекта к другому, в ходе которого, как правило не меняется способ передвижения. Одно передвижение в составе цепочки называется звеном цепочки. Существует большое количество возможных видов цепочек передвижений, но, согласно данным обследований, в основном совершаются только несколько наиболее распространенных видов цепочек. В частности, большинство совершаемых цепочек содержат 2 или 3 звена, поэтому в упрощенной модели достаточно рассмотреть только такие цепочки. Кроме того, большинство совершаемых цепочек передвижений в качестве одной из целей содержит место работы, поэтому в упрощенной модели можно ограничиться только 2-звенными цепочками вида $(H \rightarrow W \rightarrow H)$, $(H \rightarrow C_1 \rightarrow H)$, ..., $(H \rightarrow C_n \rightarrow H)$ и 3-звенными вида $(H \rightarrow W \rightarrow C_1 \rightarrow H)$, ..., $(H \rightarrow W \rightarrow C_n \rightarrow H)$, где, как и в предыдущем разделе, H обозначает дом, W — место работы, $C_1, \dots, C_n$ — различные виды культурно-бытовых объектов посещения, рассматриваемые в модели.

В самом общем приближении цепочки могут быть учтены при формировании коэффициентов подвижности. Обозначим через μ^{HXH} , μ^{HXYH} количество совершаемых 2- или 3-звенных цепочек, где X , Y обозначают различные цели передвижений. Звенья цепочек дают вклад в соответствующие слою передвижений, так что коэффициенты подвижности m^{XY} , введенные в разделе 2.1, вычисляются по формулам

$$m^{HX} = \mu^{HXH} + \sum_Y \mu^{HXYH},$$

$$m^{XH} = \mu^{HXH} + \sum_Y \mu^{HXYH},$$

$$m^{XY} = \mu^{HXYH}.$$

Таблица 4

Агрегированные показатели работы транспортной сети		
Показатель	Автомоб. тр-т	Обществ. тр-т
	тыс.прив.ед.	тыс.пасс.
Утренний час		
Работа (км)	12 200	25 000
Затраты времени (час)	530	1530
Число поездок	810	1900
Средняя длина поездки	15,11	13,14
Среднее время поездки	39,41	48,23
Средняя скорость (км/час)	23,00	16,34
Дневной час		
Работа (км)	10 900	16 000
Затраты времени (час)	390	970
Число поездок	700	1270
Средняя длина поездки	15,55	12,53
Среднее время поездки	33,13	45,54
Средняя скорость (км/час)	28,16	16,50
Вечерний час		
Работа (км)	11 900	24 600
Затраты времени (час)	500	1500
Число поездок	780	1870
Средняя длина поездки	15,25	13,14
Среднее время поездки	38,93	47,91
Средняя скорость (км/час)	23,50	16,45

Для моделирования распределения 3-звенных цепочек передвижений по территории города необходимо, вообще говоря, перейти от рассмотрения матриц корреспонденций к 3-индексным массивам вида F_{ijk}^{HXYH} , где i — район отправления, j, k — районы 1-й и 2-й цели посещения соответственно. В соответствии с идеологией «притяжения» следует предположить, что вероятность совершения цепочки передвижений должна зависеть от транспортной дальности всей цепочки (включая возвращение домой): $C_{ijk} = C_{ij} + C_{jk} + C_{ki}$.

При моделировании цепочек обычно используется предположение, что одна из целей посещения в цепочке может считаться главной, а другие — вто-

ростепенными, или попутными. При таком предположении можно предложить модель для расчета корреспонденций, не требующую работы с 3-индексным массивом. Рассмотрим, например, цепочку ($H \rightarrow W \rightarrow C \rightarrow H$), где работа W — главная цель, а C — попутная. Совершение одной такой цепочки передвижений дает вклад в 3 матрицы: F^{HW} , F^{WC} , F^{CH} . Будем считать, что корреспонденции дом—работа формируются вне зависимости от возможных попутных посещений. Тогда для вычисления матрицы F^{HW} можно использовать стандартную гравитационную модель, причем в качестве меры дальности использовать усредненную цену передвижения $(C_{ij} + C_{ji})/2$. Полная матрица

возвратных передвижений с работы домой является транспонированной к матрице прямых передвижений: $F^{WH} = (F^{HW})^T$.

Обозначим через $\tilde{F}^{WCH}$ ту часть матрицы возвратных передвижений, которая совершается с попутным посещением некоторого объекта C , $k^{WCH} < 1$ — известную из обследования подвижности долю таких передвижений от общего числа возвращений с работы домой. Тогда $\tilde{F}^{WCH} = (1 - k^{WCH})F^{WH}$. Для полного описания таких передвижений необходимо каждый элемент этой матрицы распределить по возможным районам промежуточных посещений l :

$$\tilde{F}_{ij}^{WCH} = \sum_l f_{ilj}^{WCH}. \quad (4)$$

Зная f_{ilj}^{WCH} , можно вычислить вклады звеньев этой цепочки в соответствующие матрицы корреспонденций:

$$\tilde{F}_{il}^{WC} = \sum_j f_{ilj}^{WCH}, \quad \tilde{F}_{lj}^{CH} = \sum_i f_{ilj}^{WCH}. \quad (5)$$

Для расчета такого распределения естественно применить гравитационную модель с мерой дальности ($C_{il} + C_{lj}$). Передвижения в этой гравитационной модели должны быть сбалансированы с учетом условий (4). Эти условия более сильные, чем просто балансы по отправлению в местах работы i и по прибытию в местах жительства j , так как фиксируют каждую возвратную корреспонденцию $i \rightarrow j$. Дополнительно можно предположить, что балансировка по объемам промежуточных посещений в каждом районе l не требуется, т. е. что емкости районов достаточно велики и не сдерживают возможных объемов промежуточных посещений. Данное предположение можно считать выполненным в современных условиях для большей части посещений культурно-бытового характера. Тогда распределение f_{ilj}^{WCH} может быть вычислено «поэлементно», т. е. отдельно для каждой пары i, j по формулам

$$f_{ilj}^{WCH} = \tilde{F}_{ij}^{WH} \frac{m_l^C G(C_{il} + C_{lj})}{\sum_k m_k^C G(C_{ik} + C_{kj})},$$

где $G(C)$ — функция тяготения гравитационной модели, m_l^C — емкость района l по объектам посещения типа C (уточним, что емкости районов по объектам промежуточного посещения входят в формулу для вычисления корреспонденций в качестве множителя, хотя точная балансировка корреспонденций по объемам промежуточных посещений не производится). Заметим, что в формулах (5) индекс i фиксирован, а суммирование производится только по индексам j и l , поэтому вычисление матриц корреспонденций $\tilde{F}^{WC}$, $\tilde{F}^{CH}$ реализуется последовательными операциями с 2-мерными матрицами

и не требует хранения всего 3-индексного массива f^{WCH} в процессе вычислений.

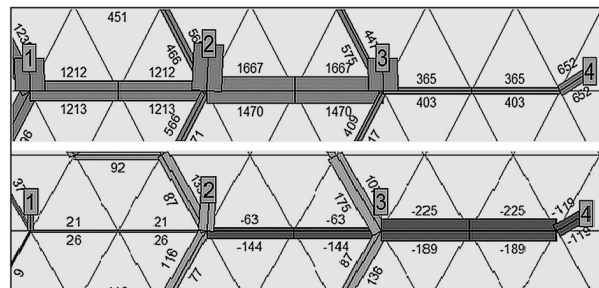


Рис. 4. Пример прогноза загрузки с явным учетом цепочек

Модель, учитывающая цепочки описанным образом, практически реализована и протестирована на примере небольшой транспортной сети. На рис. 4 приведены расчетные значения потоков на фрагменте сети. В показанном фрагменте рабочие места сосредоточены в основном в районах 1 и 2, жилье — в районе 3, а места вспомогательных посещений — в районах 2 и 4. В верхней части рисунка показаны абсолютные значения потоков, рассчитанных с учетом цепочек, в нижней части — сравнение потоков, рассчитанных с учетом и без учета цепочек. Видно, что учет цепочек адекватно воспроизводит увеличенное посещение объектов промежуточного посещения, находящихся на пути с работы домой.

4. Выводы

В работе представлена общая структура математической модели работы транспортной системы крупного города или городской агломерации, предназначенная для прогнозирования изменений в этой работе при краткосрочных или долгосрочных изменениях градостроительного характера или при изменениях в транспортной структуре и организации движения.

Отличительными характеристиками модели являются:

- учет различия характеристик дальности и часовой неравномерности передвижений, совершаемых с разными целями;
- последовательное использование концепции обобщенной цены передвижения в качестве критерия оценки путей и межрайонных «транспортных» дальностей;
- учет взаимной связанности передвижений (учет «цепочек»), при сохранении простой вычислительной схемы в рамках 4-шагового подхода.

Дальнейшая работа может быть связана со сбором и анализом актуальных эмпирических данных о подвижности, структуре передвижений и других аспектах транспортного поведения населения и дальнейшим развитием модели с учетом такого анализа.

Литература

1. *Ortuzar J. d. D., Willumsen L. G.* Modelling Transport. Wiley, 2011.
2. *Швецов В. И.* Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и Телемеханика. 2003. no. 11. P. 3–46.
3. *Алиев А. С., Стрельников А. И., Швецов В. И., Шершевский Ю. З.* Моделирование транспортных потоков в крупном городе с применением к Московской агломерации // Автоматика и телемеханика. 2005. Vol. 11. P. 113–125.
4. *Carrothers G. A. P.* An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction // Journal of the American Institute of Planners. 1956. Vol. 22. P. 94–102.
5. *Wilson A. G.* A statistical theory of spatial distribution models // Transpn. Res. 1967. Vol. 1. P. 253–270.
6. *Wilson A. G.* A family of spatial interaction models and associated developments // Envir. & Plan. A. 1971. Vol. 3. P. 255–282.
7. *Wardrop J. G.* Some theoretical aspects of road traffic research // Proc. Institution of Civil Engineers II. 1952. P. 325–378.
8. *Sheffy Y.* Urban Transportation Networks. Englewood Cliffs N.J: Prentice-Hall, 1985.
9. *Spiess H., Florian M.* Optimal strategies: a new assignment model for transit networks // Transpn. Res. B. 1989. Vol. 23. P. 83–102.
10. *Algers S., Daly A., Kjellman P., Widlert S.* Stockholm Model System (SIMS): Application // 7th World Conference of Transportation Research. Sydney, Australia: 1995.
11. *Rossi T., Shiftan Y.* Tour Based Travel Demand Modelling in the U.S. // Proceeding of the 8th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Transportation Systems. Chania, Greece: 1997.
12. *Попков Ю. С., Посохин М. В., Гутнов А. Э., Шмудьян Б. Л.* Системный анализ и проблемы развития городов. Москва: Наука, 1983. 14
13. *Sheppard E. S.* Gravity parameter estimation // Geographical Analysis. 1979. Vol. 11. P. 120–132.
14. *Лившиц В. В., Стрельников А. И.* Калибровка и проверка гравитационной статистической модели трудовых корреспонденций // Автоматизация процессов градостроительного проектирования / Ред. Ромм. Москва: ЦНИИП градостроительства, 1983. P. 79–101.
15. *Sen A.* Maximum likelihood estimation of gravity model parameters // Journal of Regional Science. 1986. Vol. 26. P. 461–474.
16. *Domencich T. A., McFadden D.* Urban travel demand: a bi-havioural analysis. New York: Elsevier, 1975.
17. *Structural Analysis of Discrete Data and Econometric Applications* / Ed. by C. F. Manski, D. L. McFadden. Cambridge: The MIT Press, 1981.

Алиев Александр Семенович. С. н. с. ИСА РАН. К. т. н. Окончил в 1980 г. МИИТ. Количество печатных работ: 17. Область научных интересов: математическое моделирование транспортных потоков. E-mail: aliev2@org.ru

Мазурин Дмитрий Сергеевич. Исследователь ИСА РАН (математик). Окончил в 2013 г. МФТИ. Количество печатных работ: 2. Область научных интересов: математическое моделирование транспортных потоков. E-mail: mazurin@isa.ru

Максимова Дарья Алексеевна. Студентка МФТИ. Область научных интересов: математическое моделирование транспортных потоков. E-mail: maksimova733@gmail.com

Швецов Владимир Иванович. Вед. н. с. ИСА РАН. К. ф.-м. н. Окончил в 1983 г. МГУ. Количество печатных работ: 35. Область научных интересов: математическое моделирование транспортных потоков. E-mail: Vl.Shvetsov@mail.ru